

в рекомбинирующем у стенок трубопровода газе довольно высок и способен значительно менять локальный состав смеси. Перестройка поля температуры за счет теплового эффекта химической реакции сказывается на кинематических характеристиках течения, а также на величине энергии турбулентных пульсаций. Последняя существенно увеличивается в реагирующем потоке. Исследование показывает, что учет химических превращений оказывает влияние на интегральные характеристики процесса.

Таким образом, предложенные в работе подходы, модели и методы прогноза сложных течений в ТП с секциями сложной формы стенки неизменно демонстрируют высокую точность, весьма корректны для систем со специфической реологией и могут быть полезны при выполнении заданий, связанных с организацией эффективного управления транспортировкой продуктов в режимах быстропротекающих процессов.

### Литература

1. Бубенчиков А.М., Гольдин В.Д., Панько С.В., Старченко А.В., Харламов С.Н. Исследование турбулентных вихревых течений газа и аэродисперсных смесей в камерах и свободном пространстве // Третий Сибирский конгресс по прикладной и индустриальной математике (ИНПРИМ'98). Ч.2. Сек. Механика. 1998. - Новосибирск, 1998. - С. 89 – 90.
2. Бубенчиков А.М., Харламов С.Н. Математические модели неоднородной анизотропной турбулентности во внутренних течениях. - Томск: Изд-во ТГУ, 2001. - 440 с.
3. Kharlamov S.N. Mathematical Modelling of Thermo- and Hydrodynamical Processes in Pipelines (academic book). Rome, Italy: Publ. House "Ionta", 2010. 263p.
4. Kharlamov S.N., Alginov R.A. Modelling of Complex Shear Flow Structure in Pipelines // International Journal of Engineering, Science and Innovative Technology, 2014. – Vol. 3, - Iss. 6. –С. 500-509.
5. Харламов С.Н. Выработка решений по защите теплообменников от гидравлического удара. Материалы итогового отчета в ООО "Томский инженерно-технический центр". Томск. 2012 (Хд № 1-526/12у от 01.08.2012г.).

## ЯВЛЕНИЕ РОЛЛОВЕРА ДЛЯ ХРАНИЛИЩ СЖИЖЕННОГО ПРИРОДНОГО ГАЗА

**Р.Х. Агеев**

Научный руководитель профессор С.Н. Харламов

*Национальный Исследовательский Томский Политехнический Университет, г. Томск, Россия.*

Система хранения сжиженного природного газа (СПГ) включает в себя следующие элементы: стационарные резервуары; оборудование, предназначенное для заполнения резервуаров от технологических линий сжижения газа; оборудования для отгрузки (стендеры); оборудование, обеспечивающее безопасность хранения СПГ. При этом стоимость резервуарного парка составляет до 50 % стоимости всего комплекса. Соответственно, к этим сооружениям должны предъявляться особые требования как при строительстве, так и при эксплуатации [1].

Несмотря на малую аварийность объектов хранения СПГ, всё же аварии происходили и при строительстве, и при эксплуатации. Одной из технологических проблем при эксплуатации является стратификация жидкости в хранилище, и затем возможное резкое перемешивание слоев и интенсивное парообразование, превышающее стационарное испарение, что может привести к повреждению резервуара [2].

В зарубежной литературе данный процесс получил название «ролlover» (rollover - «переворачивание») Физическая модель процесса отличается тем, что при загрузке резервуара свойства продукта, уже хранящегося в изотермическом резервуаре (ИР), отличаются от свойств СПГ, закачиваемого в резервуар. В ИР, оборудованных системой нижнего налива, СПГ, имеющий большую плотность, образует нижний слой. СПГ, имеющий меньшую плотность, формирует верхний слой, который располагается над поверхностью нижнего, не перемешиваясь с ним. Перегретаясь относительно температуры насыщения за счет внешнего теплопритока через днище и стенки, продукт в нижнем слое при этом не имеет возможности компенсировать теплоприток за счет испарения, т.к. поверхность теплообмена закрыта нижним слоем. Однако имеют место процессы тепло- и массообмена двух слоев между собой и верхнего слоя с парогазовой фазой. В конечном итоге, в определенный момент времени после загрузки и образования стратификации, за счет описанных выше процессов плотности слоев выравниваются с последующей резкой интенсификацией процессов испарения продукта (ролlover). В этом случае важно знать время наступления «ролloverа» и возможное парообразование, чтобы предотвратить повреждение хранилища.

Поэтому изучение явления ролloverа является актуальной, особенно для России, т.к. на о. Сахалин уже действует завод по производству СПГ и рассматриваются варианты строительства аналогичных заводов на Штокмановском месторождении и на п-ве Ямал, а нормативно-техническая база для объектов СПГ практически отсутствует.

### Причины ролloverа:

- Когда есть разница температур жидкости.
- Если СПГ хранится в течение длительного времени без циркуляции.
- Если две различные партии СПГ хранятся в одном резервуаре

### Эффект от ролloverа:

- Увеличение скорости испарения до 10 раз, в отличии от нормального состояния
- Повышение давления бака
- Подъем предохранительного клапана резервуара

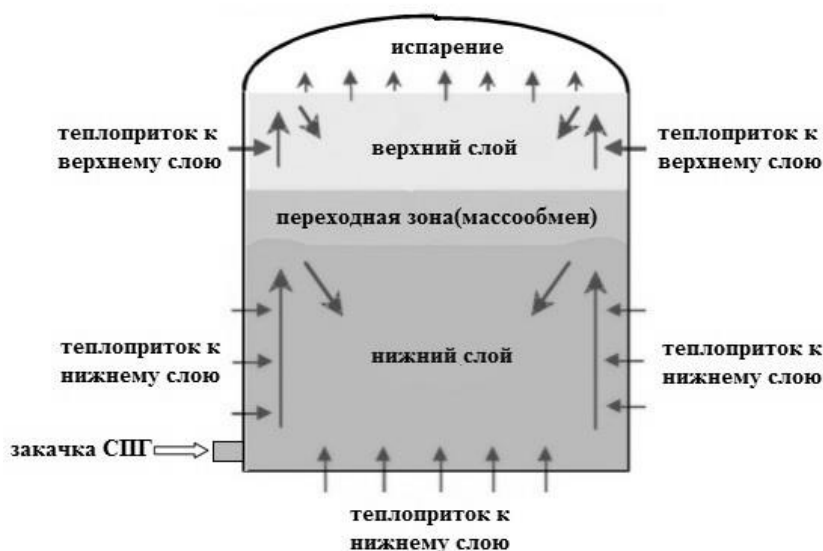


Рис. 1 Перемешивание слоев при закачке продукта в резервуар с процессами тепло- и массообмена

**Меры по предотвращению ролловера:**

- Партии СПГ с различной плотностью, хранить отдельно
- Загрузка резервуара со специальным оборудованием, такими как насадки способствующие смешиванию СПГ при загрузке (используется для береговых резервуаров).
- Следует избегать продолжительных остановок подачи СПГ при загрузке резервуара.
- Постоянно контролировать уровень испарения СПГ

Как было отмечено выше, причина явления переворачивания слоев - недостаточное смешивание поступающей в резервуар партии продукта с уже находящейся в нем жидкостью. Однако стратификация с дальнейшим вскипанием может также произойти при выдерживании СПГ в течение длительного времени в резервуаре без рециркуляции или при содержании азота в составе СПГ более 1 % (такая пороговая концентрация установлена по данным международных исследований явления rollover). Для предотвращения стратификации резервуар оснащается системой рециркуляции с использованием насосов, а налив продукта должен быть организован предпочтительно таким образом, чтобы более тяжелый продукт образовывал верхний слой и смешение фаз, происходило за счет естественной гравитации. Поэтому конструкция резервуара должна предусматривать системы верхнего и нижнего налива, а также средства контроля плотности и температуры на разных уровнях. Кроме того, как правило, предусматривается многоуровневая защита резервуара от превышения внутреннего избыточного давления газовой фазы, обеспечивающая сброс газа в атмосферу или на факел [3].

Чтобы предсказать параметры, при которых может произойти явление ролловера, необходимо провести математическое моделирование процесса. Математическое моделирование явления ролловера предполагает использование уравнений математической физики, характеризующих процессы переноса теплоты, массы и импульса в рамках термодинамики необратимых процессов.

**Литература**

1. Интернет-ресурсы: <http://lngas.ru/life-safety-lng/problems-termodynamika-spg.html>.
2. Рахимов В.О. Метод расчёта теплогидравлического режима резервуара для хранения сжиженного природного газа / В.О. Рахимов, Г.Е. Коробков // Рассохинские чтения: материалы межрегионального семинара (3-4 февраля 2012 года) / под. ред. Н.Д. Цахая. – Ухта: УГТУ, 2012 – С. 312-316.
3. Васильев, Г. Г. Особенности обеспечения безопасной эксплуатации крупногабаритных изотермических резервуаров для хранения сжиженного природного газа / Г. Г. Васильев, С. Г. Иванцова, А. И. Рахманин // Газовая промышленность. – Выпуск: 11 11. – Москва: РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2013 – С. 57-61.

**МЕТОД РАСЧЕТА ПРОЦЕССОВ ТЕПЛО- И МАССОБМЕНА СТРАТИФИЦИРОВАННОЙ  
ЖИДКОСТИ В ХРАНИЛИЩЕ СЖИЖЕННОГО ПРИРОДНОГО ГАЗА**

**Р.Х. Агеев**

Научный руководитель профессор С.Н. Харламов

**Национальный Исследовательский Томский Политехнический Университет, г. Томск, Россия.**

В настоящее время газовая промышленность России достигла высокого уровня как по добыче газа, так и по его реализации. Однако отсутствие магистральных газопроводов на некоторых территориях страны создает проблемы газификации таких регионов сетевым газом. Поэтому вполне обоснованной является необходимость